ChinaXiv合作期刊



doi:10.13866/j.azr.2019.03.18

# 基于 SPEI 指数的新疆天山草地近 55 a 干旱特征 ①

郭燕云[1,2]， 胡 琦[3]， 傅玮东[1,2]， 王 森[1,2]， 刘 艳[4]

（1. 新疆农业气象台，新疆 乌鲁木齐 830002；2. 中亚大气科学研究中心，新疆 乌鲁木齐 830002；
3. 中国农业大学资源与环境学院，北京 100193；4. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002）

**摘 要：** 标准化降水蒸散指数(SPEI)通过标准化潜在蒸散与降水的差值，表征一个地区干湿状况偏离常年的程度，是分析干旱演变趋势的新的理想指标，目前已经广泛应用于干旱评估、水资源管理等领域。利用 SPEI 和 1961—2015 年新疆天山山区 8 个代表站点的月降水量及月平均气温资料，对天山山区 55 a 以来气温和降水的变化特征、不同时间尺度的干旱变化特征、草地生长季干旱特征及变化趋势进行了分析，结果表明：近 55 a，天山山区气温呈现显著的上升趋势；降水量总体呈略微上升的趋势，但年际变化较大，变化趋势不显著；天山山区月、季、半年尺度以及年尺度的干旱事件分别为 42 个、25 个、16 个和 7 个；天山山区草地生长季发生轻度、中度和重度干旱的频率分别为 37.5%、7.1% 和 1.8%；近 55 a，天山山区草地生长季降水量有所增加，但由于气温升高带来的蒸散作用加强，气候仍呈变干的趋势。近 55 a 来，天山山区草地生长季气候存在变干的倾向，且年际间的干旱程度变化剧烈，对草地的年际间生长状况差异存在较大的影响。

**关键词：** 干旱；SPEI 指数；草地生长季；气候变化；天山山区；新疆

干旱是我国农牧业生产中比较严重的一种气象灾害，草地干旱阻碍牧草正常返青和生长发育，导致草地地上生物量减少，进而影响区域畜牧业的可持续发展。研究表明，春旱发生时，牧草返青期比正常年份推迟 10 ~ 15 d，且春旱越严重，返青越晚；而夏旱的发生往往导致牧草产量降低、品质变劣、适口性差等[1]。干旱成因较复杂，影响因素很多，包括气象、水文、地质地貌和人类活动等，需选择合适、定量化的指标来有效表征干旱发生的时间周期、强度及空间范围等。张强等[2-3]系统分析了国际上干旱监测预警技术的发展历程及各种干旱指数的主要特征和相互关系，指出常用于农业干旱监测和预报的干旱指数主要有降水距平百分率(Pa)、Palmer 干旱强度指数(PDSI)、水分亏缺指数(CWDI)[4]、气象干旱指数(CI)[5-6]、标准化降水指数（SPI）[7-8]及较新的标准化降水蒸散指数(SPEI)等[9]。其中，SPEI 广泛应用于干旱评估[10]、水文干旱分析[11]等，该指数基于降水和蒸散，集成了 PDSI 对温度的敏感性、SPI 的计算简单及多时空、多尺度的优点，使得干旱及干旱化趋势结果更趋客观，最重要的是 SPEI 考虑了温度这个气象因子，将蒸发对干旱的影响和贡献考虑了进来[12]，因而更适于进一步认识气候变暖背景下干旱发生发展的机制，且表现出更优的旱情监测效果[13]。

新疆是我国最重要的牧区之一，天山山区位于塔里木盆地北部、准噶尔盆地南缘，属于干旱半干旱的大陆性气候，草地是其主要的植被覆盖类型之一。该地区生态脆弱，干旱造成的水资源短缺是影响该地区生态平衡、制约草地资源可持续发展和生态文明建设的关键因素，而且随着气候变暖西北地区极端干旱事件发生频率和强度均呈增加趋势，影响不断加重[14]。因此，探求天山山区的干旱变化特征对该地区防灾减灾、保护草地资源具有重要的现实意义，也受到越来越多的学者的重视。近几年，针对新疆地区的降水及干旱变化研究较多[15-16]，然而大都以南、北疆[17]作为研究重点，缺乏对天山山区的专题研究，特别是系统的阐述过去 55 a 干旱变化状况。本文选择标准化降水蒸散指数(SPEI)作为干旱指标，以长时间观测序列数据分析新疆天山山区 1961 年以来气温和降水的变化特征，从不同时间尺

① **收稿日期：** 2018-07-25； **修订日期：** 2018-11-14
**基金项目：** 中亚大气科学研究基金项目（CASS201716）；国家自然科学基金项目(41475104,41271053)；中央级科研院所基本科研业务费(IDM2016004)资助
**作者简介：** 郭燕云(1985-)，女，硕士研究生，工程师，主要从事农牧业气象业务与科研工作. E-mail：yanyunguo201049@sina.cn
**通讯作者：** 胡琦. E-mail：s10020292@can.edu.cn



chinaXiv:201909.00085v1

ChinaXiv合作期刊



chinaXiv:201909.00085v1

度的 SPEI 值分析天山山区干旱变化特征,并着重分析天山山区草地生长季干旱特征及其变化趋势,以期为不同时间尺度下草地干旱的及时诊断提供依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况及数据来源

中国境内的天山是亚洲天山山系的一部分,全长 1 700 km,占山系总长度的 2/3,西起中国与吉尔吉斯斯坦边界,东至哈密市东部的星星峡戈壁,是南北疆气候的分水岭。天山山区是新疆最重要的河流发源地之一,被称为干旱区的湿岛,天山山区的降水变化对新疆的环境有重要影响[18]。

本文选择新疆天山山区 8 个具有完整时间序列(1961—2015 年)的逐日气象资料的台站,分别为昭苏、新源、巴音布鲁克、巴仑台、天山大西沟、小渠子、天池和巴里坤(表 1)。气象数据源自中国地面气候资料日值数据集(V3.0),在中国气象科学数据共享服务网下载,包括逐日气温和降水。所用数据集经过严格质量控制和检查,缺测率约 1‰,缺测的气象要素采用 Matlab 编程进行订正:若缺测序列 <5 d,气温缺测值采用线性插值方法代替,降水缺测值订正为 0;若缺测序列 ≥5 d,则采用同一日值的多年平均值代替。

**表 1 研究区气象站点信息**

**Tab. 1 Information of the meteorological stations in the study area**

| 站名 | 区站号 | 经度/(°) | 纬度/(°) | 高度/m |
|---|---|---|---|---|
| 昭苏 | 51437 | 81.13 | 43.15 | 1 851.0 |
| 巴里坤 | 52101 | 93.05 | 43.60 | 1 677.2 |
| 巴仑台 | 51467 | 86.33 | 42.77 | 1 732.4 |
| 巴音布鲁克 | 51542 | 84.15 | 43.03 | 2 458.0 |
| 天山大西沟 | 51468 | 86.83 | 43.10 | 3 539.0 |
| 天池 | 51470 | 88.12 | 43.88 | 1 942.5 |
| 小渠子 | 51465 | 87.10 | 43.48 | 1 871.8 |
| 新源 | 51436 | 83.30 | 43.45 | 928.2 |
| 昭苏 | 51437 | 81.13 | 43.15 | 1 851.0 |

### 1.2 研究方法及数据处理

1.2.1 SPEI 计算 SPEI 通过计算降水与潜在蒸散量的差值偏离平均状态的程度,来表征某地区的干旱状况,计算方法如下:

计算逐月降水与潜在蒸散的差值 $D_i$:

$$D_i = P_i - PET_i$$

对降水蒸散差值 $D_i$ 数据序列标准化,由于 $D_i$ 数据序列可能存在负值,因此采用 3 参数的 Log-Logistic 概率分布 $F(x)$ 对其进行拟合,计算出每个 $D_i$ 数值对应的 SPEI 值。

记 Log-Logistic 拟合分布超过某个 $D_i$ 值的累积概率 $P = 1 - F(x)$,参数 $w = \sqrt{-2\ln P}$。

当 $P \leqslant 0.5$ 时,

$$\mathrm{SPEI} = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}$$

当 $P > 0.5$ 时,

$$\mathrm{SPEI} = -\left(w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}\right)$$

式中:常数 $c_0 = 2.515\,517$, $c_1 = 0.802\,853$, $c_2 = 0.010\,328$, $d_1 = 1.432\,788$, $d_2 = 0.189\,269$, $d_3 = 0.001\,308$。

根据上述公式,计算本研究区各个站点不同时间尺度(月、季、半年尺度和年尺度)的 SPEI(分别以 SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6, SPEI-12 表示)。SPEI 是表征干旱的标准化的特征量,反映的是当年干旱偏离正常年份的程度,数值越小表明干旱程度越强。SPEI 与干旱程度一般按照以下标准进行划分[19-20](表 2)。

**表 2 基于 SPEI 的干旱等级划分**

**Tab. 2 Drought levels based on standardized precipitation evapotranspiration index values**

| SPEI 值 | [-1,0) | [-1.5,-1) | [-2,-1.5) | <-2 |
|---|---|---|---|---|
| 干旱等级 | 轻度干旱 | 中度干旱 | 重度干旱 | 极端干旱 |

1.2.2 Mann-Kendall 检验(M-K 检验) Mann-Kendall 检验法是一种非参数统计检验方法,要求气候序列平稳且随机独立。对于时间序列变量 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, $n$ 为序列长度,定义一个统计量:

$$S_K = \sum_{i=1}^{k} r_i \quad , \quad (k = 2, 3, \cdots, n)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leqslant x_j \end{cases} \quad , \quad (j = 1, 2, \cdots, i)$$

假定时间序列随机独立,定义统计量:

$$UF_K = \frac{S_K - E(S_K)}{\sqrt{\mathrm{Var}(S_K)}} \quad , \quad (k = 1, 2, \cdots, n)$$

式中: $E(S_K) = K(K+1)/4$; $\mathrm{Var}(S_K) = k(k-1)(2k+5)/72$。

$UF_K$ 为标准正态分布,给定显著水平 $\alpha$,若 $|UF_K| > U_{\alpha/2}$,则表明序列存在明显的趋势变化,将

ChinaXiv合作期刊



chinaXiv:201909.00085v1

时间序列 $x$ 按逆序排列，再按照上式计算，同时使

$UB_K = -UF_K, (k = 1, 2, \cdots, n)$

其中，$K = n + 1 - k$

$UF_K$ 值大于0，则表明序列 $x$ 呈上升趋势，小于0则表明序列 $x$ 呈下降趋势。当 $UF_K$ 超过临界直线时，表明序列 $x$ 上升或下降趋势显著。当 $UF_K$ 和 $UB_K$ 这两条曲线出现交点，且交点在临界直线之间，那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻。

1.2.3 数据处理 本文中研究区草地生长季是指4—9月。分别计算了新疆天山山区近55 a来气温和降水的变化特征，从4个时间尺度的SPEI值分析了天山山区干旱变化特征，并着重分析了草地生长季干旱特征及变化趋势。气候倾向率、SPEI、M-K检验等的数据处理均利用Matlab 2010软件实现；站点的空间分布图利用ArcGIS 10.1软件制作，分辨率为0.02°；折线图采用Matlab 2010软件制作。

## 2 结果分析

### 2.1 气候变化背景下天山山区气温和降水变化特征

利用8个站点的日平均气温和降水资料，统计1961—2015年每个站点逐年的年降水量和平均气温，加和平均得到研究区域逐年的降水和气温平均值，进而计算了2个变量的气候倾向率（图1）。天山山区气温呈显著增加趋势（$P < 0.01$），8个代表站点的气候变化趋势均达到极显著水平。近55 a来，天山山区气温增加了1.64 ℃，平均升温趋势为

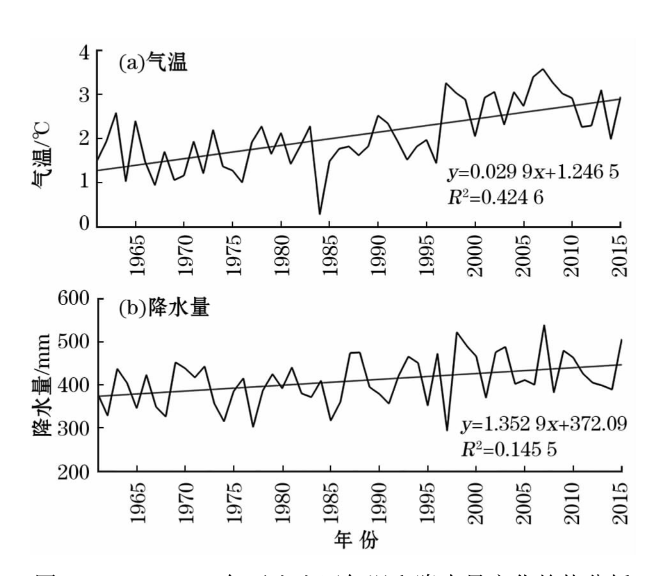



图1 1961—2015年天山山区气温和降水量变化趋势分析

Fig. 1 Change trend of temperature and precipitation in the Tianshan Mountains during the period of 1961 – 2015

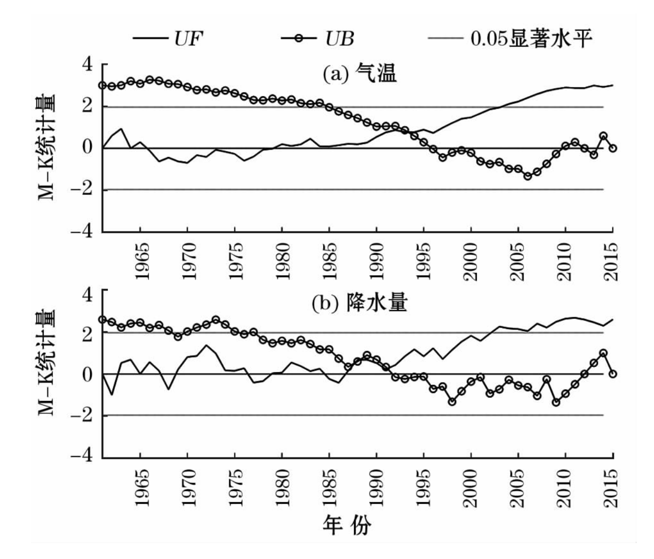



图2 1961—2015年天山山区气温和降水量M-K检验变化趋势分析

Fig. 2 Mann-Kendall test of temperature and precipitation in the Tianshan Mountains during the period of 1961 – 2015

0.30 ℃·(10a)$^{-1}$（图1a）；降水量总体呈略微的上升趋势，变化率为13.5 mm·(10a)$^{-1}$，但是降水量年际变化较大（变异系数13.9%），变化趋势不显著（图1b）。

图2显示了1961—2015年天山山区气温和降水量的M-K检验。由 $UF$ 曲线可以看出，近55 a来气温呈现上升趋势。在显著水平0.05的临界线内，$UF$、$UB$ 曲线相交于1992年，这是研究区年平均气温突变的开始（图2a）。就降水量而言（图2b），在显著水平0.05的临界线内，$UF$、$UB$ 曲线相交于1989年，这是研究区年平均降水突变的开始，1989—2000年研究区降水量呈显著增加的趋势。

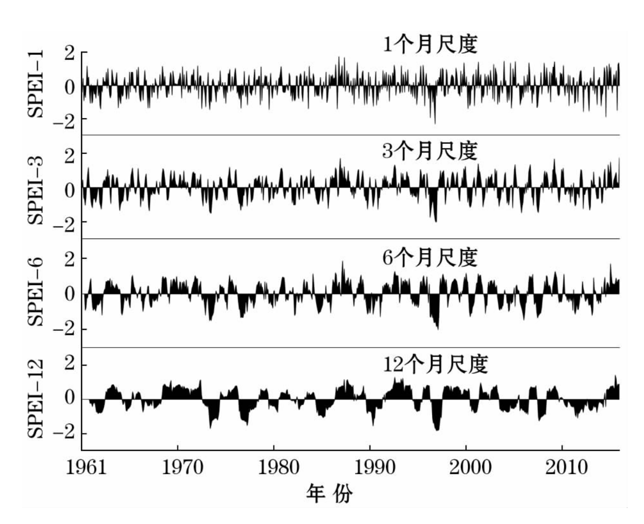
### 2.2 不同时间尺度下天山山区干旱特征

根据天山山区8个站点的日平均气温和降水资料得到逐月气温和降水，进而计算各站点不同时间尺度的SPEI，然后将各站点的SPEI进行平均，分析区域近55 a来的干旱变化特征。本文选择了4个不同时间尺度（月、季、半年尺度和年尺度）的SPEI（分别以SPEI-1，SPEI-3，SPEI-6，SPEI-12表示）进行分析（图3）。总体而言，时间尺度越短，SPEI对降水变化的响应越快，围绕0值变化的频率越快；随着时间尺度的增加，SPEI正负变化的周期数变少，但是每一个正（负）位相的持续期变长，意味着发生干旱的频率降低、持续时间增长。具体而言，SPEI-1沿着0值上下剧烈波动，反映了单月降水对干旱程度的影响；而时间尺度越大，SPEI-3、

ChinaXiv合作期刊



chinaXiv:201909.00085v1




注:SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-12 分别表示 1 个月、3 个月、6 个月和 12 个月尺度。

图 3　1961—2015 年天山山区草地生长季 SPEI 变化特征

Fig. 3　Annual change of SPEI in the Tianshan Mountains in growing season of grasslands from 1961 to 2015

SPEI-6 波动周期相对较长,可体现干湿季节变化规律;SPEI-12 相对聚拢、稳定,更能反映干旱年际变化特征。根据 McKee 定义的干旱事件发生条件[21],本文进一步计算了不同时间尺度干旱的持续时间和强度。SPEI 连续为负值并且能够达到 -1.0 时(中旱及以上)表征干旱事件的开始,SPEI 变为正值时表征干旱事件的结束,开始到结束的时间跨度即为干旱事件的持续时间。结果表明,近 55 a(1961 年以来),天山山区月尺度中旱及以上的干旱事件共有 42 个,平均持续时间为 3 个月,其中重旱和极端干旱事件共计 5 次;季尺度中旱及以上的干旱事件共有 25 个,平均持续时间为 6 个月,其中重旱事件共计 2 次,极端干旱事件 1 次;半年尺度中旱及以上的干旱事件共有 16 个,平均持续时间为 10 个月;年尺度中旱及以上的干旱事件共有 7 个,平均持续时间为 21 个月,其中重旱事件 3 次。

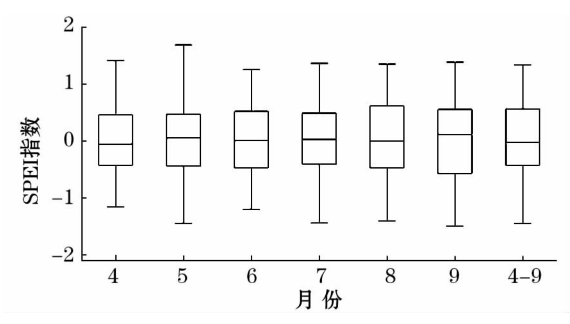
## 2.3　天山山区草地生长季逐月干旱特征

为了进一步研究天山山区草地生长季(4—9 月)干旱变化特征,本文除了计算月尺度 4—9 月的 SPEI 值外,还统计了半年尺度下 9 月的 SPEI 值(以 SPEI-6-9 表示),该数值综合了 4—9 月的气温和降水情况得到的结果(图 4)。总体而言,近 55 a 来,各月的 SPEI 值范围在 -2 ~2 之间,中位数值在 0 值上下浮动,上四分位数和下四分位数分别在 0 ~1 和 -1 ~0 之间;SPEI-6-9 值的中位数小于 0,表明天山山区草地生长季总体偏旱。

同时,依据月尺度的 4—9 月 SPEI 和半年尺度的 SPEI-6-9 指数,分析了天山山区草地生长季不同干旱等级频率分布情况(表 3)。结果显示,近 55 a 来,天山山区草地生长季发生干旱的频率在 42.9% ~51.8%。干旱主要以轻度干旱为主,发生轻度干旱的频率在 30.4% ~44.6%,4 月和 6 月发生轻旱的频率相对较高,超过 40%;中度干旱发生的频率在 5.1% ~12.5%,8、9 月更容易发生中旱;重度干旱发生的频率较低,主要出现在 4 月和 7 月。整个生长季而言,发生轻度、中度、重度干旱的频率分别为 37.5%、7.1% 和 1.8%。

## 2.4　天山山区草地生长季干旱变化趋势分析

图 5 给出了 1961—2015 年天山山区草地生长季 SPEI 的变化趋势。近 55 a 来,天山山区草地生长季存在变干的倾向,SPEI-6-9 指数呈稍微减少的趋势,变化率为 $-0.037 \cdot (10a)^{-1}$,表明虽然降水量有所增加,但是由于气温升高带来的蒸散作用加强,气候仍呈变干的趋势。同时需要指出的是,




注:4 月,5 月,…,9 月结果分别为月尺度当月的 SPEI 值,4—9 月结果为半年尺度 9 月的 SPEI 值。表 3 同。

图 4　1961—2015 年天山山区草地生长季 SPEI 箱式图

Fig. 4　Boxplot of SPEI in the Tianshan Mountains in growing season of grasslands from 1961 to 2015

**表 3　基于 SPEI 的干旱等级标准下研究区 1961—2015 年干旱频率**

**Tab. 3　Monthly drought frequency in the study area under the drought grade standard based on the SPEI during the period of 1961-2015**　/%

| 月份 | 轻度干旱〔-1,0) | 中度干旱〔-1.5,-1) | 重度干旱〔-2,-1.5) | 总计〔-2,0) |
|---|---|---|---|---|
| 4 | 41.1 | 7.1 | 1.8 | 51.8 |
| 5 | 39.3 | 8.9 | 0.0 | 48.2 |
| 6 | 44.6 | 5.4 | 0.0 | 50.0 |
| 7 | 37.5 | 5.4 | 1.8 | 46.4 |
| 8 | 35.7 | 12.5 | 0.0 | 48.2 |
| 9 | 30.4 | 12.5 | 0.0 | 42.9 |
| 4—9 | 37.5 | 7.1 | 1.8 | 48.2 |

ChinaXiv合作期刊



chinaXiv:201909.00085v1

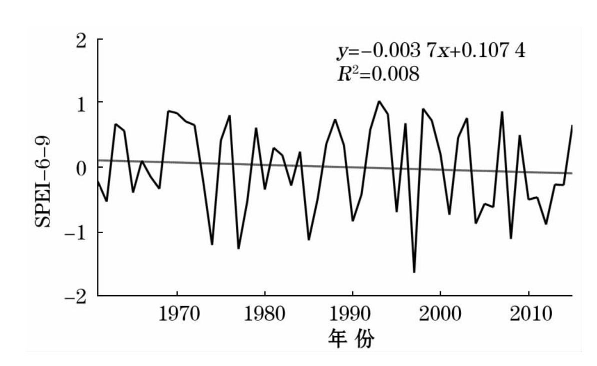



图 5　1961—2015 年天山山区草地生长季 SPEI - 6 - 9 指数变化趋势

Fig. 5　Change trend of SPEI - 6 - 9 in the Tianshan Mountains in growing season of grasslands from 1961 to 2015

SPEI - 6 - 9 指数年际间变化差异较大,表明天山山区草地生长季年际间的干旱程度变化剧烈,这对草地的年际间生长状况存在较大的影响。

## 3　结论与讨论

(1) 1961 年以来,天山山区气温呈现显著的上升趋势,平均升温趋势为 0.30 ℃ · (10a) $^{-1}$,突变点在 1992 年;降水量总体呈略微上升的趋势,变化率为 13.5 mm · (10a) $^{-1}$,但降水量年际变化较大、变化趋势不显著,突变点在 1989 年。

(2) 1961 年以来,天山山区月尺度的干旱事件共有 42 个,平均持续时间为 3 个月;季尺度的干旱事件共有 25 个,平均持续时间为 6 个月;半年尺度的干旱事件共有 16 个,平均持续时间为 10 个月;年尺度的干旱事件共有 7 个,平均持续时间为 21 个月。

(3) 1961—2015 年来,天山山区草地生长季发生干旱的频率在 42.9% ~51.8%。干旱主要以轻度干旱为主,发生频率在 30.4% ~44.6%,4 月和 6 月发生轻旱的频率相对较高;中度干旱发生的频率在 5.1% ~12.5%,8、9 月更容易发生中旱;重度干旱发生的频率较低,主要出现在 4 月和 7 月。就整个生长季而言,发生轻度干旱、中度干旱、重度干旱的频率分别为 37.5%、7.1% 和 1.8%。

(4) 草地生长与光热因子关系密切,冯缨等[22]通过对天山地区草地类型的野外调查,发现环境因子决定了草地群落,并指出降水量为影响牧草产量的主导因子,其次是气温。因此,气候变化对草地生长必然产生较大影响。姜大膀等[23]研究表明,新疆地区地表气温的升高会导致干旱化的发生,而降水的增加则有利于湿润化,在二者的联合作用下,新疆地区的干湿状况可能会发生一定程度的变化。本文研究进一步明确,近 55 a 来,天山山区草地生长季虽然降水量有所增加,但是由于气温升高带来的蒸散作用加强,气候仍呈变干的趋势。袁玉江等[24]也有类似的结论。同时,需要指出的是,天山山区草地生长季年际间的干旱程度变化剧烈,这对草地的年际间生长状况存在较大的影响。苏清荷等[25]研究也表明,在气候“干旱高温”的变化趋势下,新疆天山山区草地生物量随气候变化明显。如何选取合适的干旱指标评估草地生长季干旱是非常重要的问题。黄敬峰等[26]利用天山山区 1966—1987 年天然草地牧草产量资料将天然草地干旱定为重旱、中旱、轻旱 3 个等级,并确定了相应的降水量指标。本文选用的 SPEI 评价新疆天山草地近 55 a 干旱情况,通过气温因子将蒸发对干旱的影响和贡献考虑了进来,较单一降水指数更为科学,评价结果可为该区制定应对未来气候变化措施提供科学依据。李明等[27]、许玲燕等[28]、熊光洁等[29]也分别用 SPEI 对东北地区、云南及西南地区干旱特征进行了研究,结果表明利用 SPEI 进行全球变暖背景下的干旱监测与评估是可行的;且已有研究表明,SPEI 能够适用于我国西北地区各种气候类型的干旱分析[30-33]。然而,研究中仍存在一些不足,如本文仅以降水量和气温为基础,分析干旱发生的强度和频率,未考虑连续无降水日及对土壤水分等因素对干旱的影响。因此,未来有必要根据区域的实际情况,进一步采用连续无雨日、土壤相对湿度、降雨日数和气温等指标,并与卫星遥感监测的生态状态指数进行对比验证,对天山草地的干旱演变特征进行深入的研究。

**参考文献(References):**


〔1〕 谢金南,李栋梁,董安祥,等. 甘肃省干旱气候变化及其对西部大开发的影响〔J〕. 气候与环境研究,2002,7(3):359 - 369.〔Xie Jinnan, Li Dongliang, Dong Anxiang, et al. Effects of Gansu climate change on developing of the Western China〔J〕. Climatic and Environmental Research,2002,7(3):359 - 369.〕

〔2〕 张强,韩兰英,张立阳,等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略〔J〕. 地球科学进展,2014,29(1):80 - 91.〔Zhang Qiang, Han Lanying, Zhang Liyang, et al. Analysis on the character and management strategy of drought disaster and risk under the climatic warming〔J〕. Advances in Earth Science,2014,29(1):80 - 91.〕

〔3〕 张强,张良,崔显成,等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战〔J〕. 地球科学进展,2011,26(7):763 - 778.〔Zhang Qiang, Zhang Liang, Cui Xiancheng, et al. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring〔J〕. Advances in Earth

ChinaXiv合作期刊



Science,2011,26(7):763 – 778.〕
〔4〕 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析〔J〕. 农业工程学报,2009,25(8):28 – 34.〔Huang Wanhua,Yang Xiaoguang,Qu Huihui,et al. Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index〔J〕. Transactions of the CSAE,2009,25(8):28 – 34.〕
〔5〕 曹永强,张兰霞,张岳军,等. 基于 CI 指数的辽宁省气象干旱特征分析〔J〕. 资源科学,2012,34(2):265 – 272.〔Cao Yongqiang,Zhang Lanxia,Zhang Yuejun,et al. Analysis of drought characteristics of Liaoning Province based on the CI index〔J〕. Resources Science,2012,34(2):265 – 272.〕
〔6〕 张婧,梁树柏,许晓光,等. 基于 CI 指数的河北省近 50 年干旱时空分布特征〔J〕. 资源科学,2012,34(6):1 089 – 1 094.〔Zhang Jing,Liang Shubo,Xu Xiaoguang,et al. Temporal and spatial distribution characteristics of droughts for recent 50 years in Hebei Province based on meteorological drought composite index〔J〕. Resources Science,2012,34(6):1 089 – 1 094.〕
〔7〕 McKee T B,Doesken N J,Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales〔M〕. Anaheim,California:Eighth Conference on Applied Climatology,1993.
〔8〕 赵林,武建军,吕爱锋,等. 黄淮海平原及其附近地区干旱时空动态格局分析——基于标准化降雨指数〔J〕. 资源科学,2011,33(3):468 – 476.〔Zhao Lin,Wu Jianjun,Lü Aifeng,et al. Spatial and temporal analysis of drought over the Huang-Huai-Hai Plain and its surroundings based on the Standardized Precipitation Index〔J〕. Resources Science,2011,33(3):468 – 476.〕
〔9〕 轩俊伟,郑江华,刘志辉. 基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2016,33(2):338 – 344.〔Xuan Junwei,Zheng Jianghua,Liu Zhihui. SPEI-based spatiotemporal variation of drought in Xinjiang〔J〕. Remote Sensing of Environment,2016,33(2):338 – 344.〕
〔10〕 Sergio M Vicente-Serrano,Juan I López-Moreno,Jorge Lorenzo-Lacruz,et al. The NAO impact on droughts in the Mediterranean Region〔J〕. Advances in Global Change Research,2011,46:23 – 40.
〔11〕 Patricia Ann Jaranilla-Sanchez,Wang Lei,Toshio Koike. Modeling the hydrologic responses of the Pampanga River basin,Philippines:A quantitative approach for identifying droughts〔J〕. Water Resources Research,2011,doi. org/10. 1029/2010WR009702
〔12〕 徐一丹,任传友,马熙达,等. 基于 SPI /SPEI 指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析〔J〕. 干旱区研究,2017,34(6):1 250 – 1 262.〔Xu Yidan,Ren Chuanyou,Ma Xida,et al. Change of drought at multiple temporal scales based on SPI/SPEI in Northeast China〔J〕. Remote Sensing of Environment,2017,34(6):1 250 – 1 262.〕
〔13〕 董婷,孟令奎,张文. 1961—2012 年我国干旱演变特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(1):96 – 106.〔Dong Ting,Meng Lingkui,Zhang Wen. Evolution of drought in China during the period of 1961 – 2012〔J〕. Remote Sensing of Environment,2018,35(1):96 – 106.〕
〔14〕 张强,姚玉璧,李耀辉,等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望〔J〕. 地球科学进展,2015,30(2):196 – 213.〔Zhang Qiang,Yao Yubi,Li Yaohui,et al. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in northwest China〔J〕. Advances in Earth Science,2015,30(2):196 – 213.〕
〔15〕 谢培,顾艳玲,张玉虎,等. 1961—2015 年新疆降水及干旱特征分析〔J〕. 干旱区地理,2017,40(2):332 – 338.〔Xie Pei,Gu Yanling,Zhang Yuhu,et al. Precipitation and drought characteristics in Xinjiang during 1961 – 2015〔J〕. Arid Land Geography,2017,40(2):332 – 338.〕
〔16〕 潘淑坤,张明军,汪宝龙,等. 近 51 年新疆 S 干旱指数变化特征分析〔J〕. 干旱区资源与环境,2013,27(3):32 – 39.〔Pan Shukun,Zhang Mingjun,Wang Baolong,et al. Study on the drought index variation for Xinjiang in recent 51 years〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(3):32 – 39.〕
〔17〕 尹文杰,张梦琳,胡立堂. 柴达木盆地干旱时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):387 – 394.〔Yin Wenjie,Zhang Menglin,Hu Litang. Spatiotemporal variation of drought in the Qaidam Basin〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):387 – 394.〕
〔18〕 魏文寿,袁玉江,喻树龙,等. 中国天山山区 235 a 气候变化及降水趋势预测〔J〕. 中国沙漠,2008,28(5):803 – 808.〔Wei Wenshou,Yuan Yujiang ,Yu Shulong,et al. Climate change in recent 235 years and trend prediction in Tianshan Mountainous area〔J〕. Journal of Desert Research,2008,28(5):803 – 808.〕
〔19〕 高瑞,王龙,杨茂灵,等. 基于 SPEI 的南盘江流域近 40 年冬春干旱时空特征研究〔J〕. 灌溉排水学报,2013,32(3):67 – 70.〔Gao Rui,Wang Long,Yang Maoling,et al. Spatio-temporal characteristic of winter and spring drought based on standardized precipitation evapo-transpiration index in Nanpanjiang Basin〔J〕. Journal of Irrigation and Drainage,2013,32(3):67 – 70.〕
〔20〕 张强,邹旭恺,肖风劲. GB/T 20481 – 2006,气象干旱等级〔S〕. 北京:中国标准出版社,2006:12 – 17.〔Zhang Qiang,Zou Xukai,Xiao Fengjin. GB/T20481 – 2006 Classification of Meteorological Drought Category〔S〕. Beijing:Standards Press of China,2006:12 – 17.〕
〔21〕 McKee T B,Doesken N J,Kleist J,et al. Drought monitoring with multiple time scales〔C〕//Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. Boston:American Meteorological Society,1995:233 – 236.
〔22〕 冯缨,许鹏,安沙舟,等. 天山北坡中段草地类型多样性研究〔J〕. 干旱区资源与环境,2005,19(4):59 – 62.〔Feng Ying,Xu Peng,An Shazhou,et al. Study on the diversity of rangeland type in middle zone of northern slop of Tianshan Mountain〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2005,19(4):59 – 62.〕
〔23〕 姜大膀,苏明峰,魏荣庆,等. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估〔J〕. 大气科学,2009,33(1):90 – 98.〔Jiang Dabang,Su Mingfeng,Wei Rongqing,et al. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang〔J〕. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2009,33(1):90 – 98.〕
〔24〕 袁玉江,穆桂金. 新疆天山山区近 40 年春季气候变化特征与平原区的比较〔J〕. 干旱区地理,2004,27(1):35 – 40.〔Yuan Yujiang,Mu Guijin. Features of spring climate change in Tianshan Mountainous area for the recent 40 years and comparison with that in plain area of Xinjiang〔J〕. Arid Land Geography,2004,27(1):35 – 40.〕
〔25〕 苏清荷,安沙舟,赵玲. 基于 5 种气候生产力模型的天山北坡主要草地类型 NPP 计算分析〔J〕. 新疆农业科学,2010,47(9):1 786 – 1 791.〔Su Qinghe,An Shazhou,Zhao Ling. Computation and analysis of NPP in northern slope of Tianshan Mountain based on 5 kinds of Climate:Productivity model〔J〕. Xinjiang Agri-

chinaXiv:201909.00085v1

ChinaXiv合作期刊



cultural Sciences,2010,47(9):1 786 – 1 791.〕
〔26〕 黄敬峰,李建龙. 天山北坡天然草地干旱等级及指标初探〔J〕. 草业科学,1992,9(2):43 – 46.〔Huang Jingfeng,Li Jianlong. The drought grade,type and indices in natural steppe of The North Slope of Tianshan〔J〕. Prataculturał Science,1992,9(2):43 – 46.〕
〔27〕 李明,王贵文,张莲芝. 基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析〔J〕. 干旱区资源与环境,2016,30(6):65 – 70.〔Li Ming,Wang Guiwen,Zhang Lianzhi. Drought characteristics analysis and the zoning based on standardized precipitation evapotranspiration index in Northeast China〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment,2016,30(6):65 – 70.〕
〔28〕 熊光洁,张博凯,李崇银,等. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961—2012 年干旱变化特征分析〔J〕. 气候变化研究进展,2013,9(3):192 – 198.〔Xiong Guangjie,Zhang Bokai,Li Chongyin,et al. Characteristics of drought variations in Southwest China in 1961 – 2012 based on SPEI〔J〕. Advances in Climate Change Research,2013,9(3):192 – 198.〕
〔29〕 许玲燕,王慧敏,段琪彩,等. 基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析〔J〕. 资源科学,2013,35(5):1 024 – 1 034.〔Xu Lingyan,Wang Huimin,Duan Qicai,et al. The temporal and spatial distribution of drought during summer corn growth in Yunnan Province based on SPEI〔J〕. Resources Science,2013,35(5):1 024 – 1 034.〕
〔30〕 张勃,张耀宗,任培贵,等. 基于 SPEI 法的陇东地区近 50 a 干旱化时空特征分析〔J〕. 地理科学,2015,35(8):999 – 1 006.〔Zhang Bo,Zhang Yaozong,Ren Peigui. Analysis of drought spatial-temporal characteristics based on SPEI in eastern region of Gansu in recent 50 years〔J〕. Scientia Geographica Sinica,2015,35(8):999 – 1 006.〕
〔31〕 张调风,李林,刘宝康,等. 基于 SPEI 指数的近 52 年青海省农(牧)作物生长季干旱动态格局分析〔J〕. 生态学杂志,2014,33(8):2 221 – 2 227.〔Zhang Tiaofeng,Li Lin,Liu Baokang,et al. Dynamic pattern of drought in crop (grass) growth season over Qinghai Province during last 52 years,based on standardized precipitation evapotranspiration index〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2014,33(8):2 221 – 2 227.〕
〔32〕 马琼,张勃,王东,等. 1960—2012 年甘肃黄土高原干旱时空变化特征分析〔J〕. 资源科学,2014,36(9):1 834 – 1 841.〔Ma Qiong,Zhang Bo,Wang Dong,et al. The temporal and spatial distribution of drought on the Loess Plateau based on the standardized precipitation evapotranspiration index from 1960 to 2012〔J〕. Resources Science,2014,36(9):1 834 – 1 841.〕
〔33〕 周丹,张勃,任培贵,等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 a 干旱特征分析〔J〕. 自然资源学报,2014,29(4):677 – 688.〔Zhou Dan,Zhang Bo,Ren Peigui,et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on standardized precipitation evapotranspiration index〔J〕. Journal of Natural Resources,2014,29(4):677 – 688.〕

# Drought Trend over the Grasslands in the Tianshan Mountains, Xinjiang in Recent 55 Years Based on SPEI

GUO Yan-yun[1,2], HU Qi[3], FU Wei-dong[1,2], WANG Sen[1,2], LIU Yan[4]
(1. *Xinjiang Agrometeorological Observatory*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*;
2. *Central Asian Center for Atmospheric Sciences*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*;
3. *College of Resources and Environmental Sciences*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*;
4. *Institute of Desert Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*)

**Abstract:** Calculated by standardizing the difference between potential evapotranspiration and precipitation, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) shows the drought degree deviation from normal conditions. As an ideal indicator for analyzing the drought evolution trend, SPEI is widely used in drought assessment, water resources management and other fields. The characteristics of the temperature, precipitation, temporal distribution and variation of the temperature, precipitation, slight, moderate and severe drought frequencies and their trends in growing season of grasslands were analyzed using the SPEI method based on the monthly mean air temperature and monthly precipitation at 8 meteorological stations over the Tianshan Mountains in Xinjiang during the period from 1961 to 2015. Results showed that the annual temperature in the study area was in a significant increase trend in recent 55 years. The precipitation was generally in a slight increase trend with a larger inter-annual variability, but the change trend was not significant. The numbers of drought events at monthly, seasonal, semi-annual and annual scales in the Tianshan Mountains were 42, 25, 16 and 7 respectively. The frequencies of slight, moderate and severe drought in growing season of grasslands were 37.5%, 7.1% and 1.8% respectively. In recent 55 years, the climate over the grasslands in the Tianshan Mountains in growing season of grasslands became dry, and the annual degree of drought changed dramatically, which affected significantly the growth of the grasslands.

**Key words:** drought; SPEI; grasslands growing season; climate change; Tianshan Mountains; Xinjiang

chinaXiv:201909.00085v1